

(43) Date of publication of application: 18.04.03

C21D 7/06
B23P 6/00

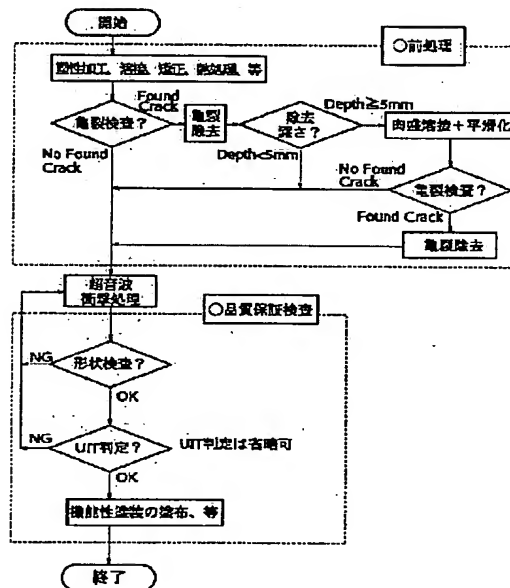
(71) Applicant: **NIPPON STEEL CORP**

(72) Inventor: TOMINAGA NORIYOSHI
MATSUOKA KAZUMI
ISHIKAWA TADASHI
KASUYA TADASHI
HONMA KOJI

(57) Abstract:

SOLUTION: The method for improving the fatigue life comprises pretreating a portion which may cause the fatigue of the metal material, treating it with ultrasonic shock, and subsequently conducting a quality assurance inspection, to improve the fatigue life.

COPYRIGHT: (C)2003,JPO



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-113418

(P2003-113418A)

(43) 公開日 平成15年4月18日 (2003.4.18)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード [*] (参考)
C 2 1 D 7/06		C 2 1 D 7/06	Z
B 2 3 P 6/00		B 2 3 P 6/00	Z

審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2001-308355(P2001-308355)

(22) 出願日 平成13年10月4日 (2001.10.4)

(71) 出願人 000006655

新日本製鐵株式会社

東京都千代田区大手町2丁目6番3号

(72) 発明者 富永 知徳

富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社技術開発本部内

(72) 発明者 松岡 和巳

富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社技術開発本部内

(74) 代理人 100107250

弁理士 林 信之 (外2名)

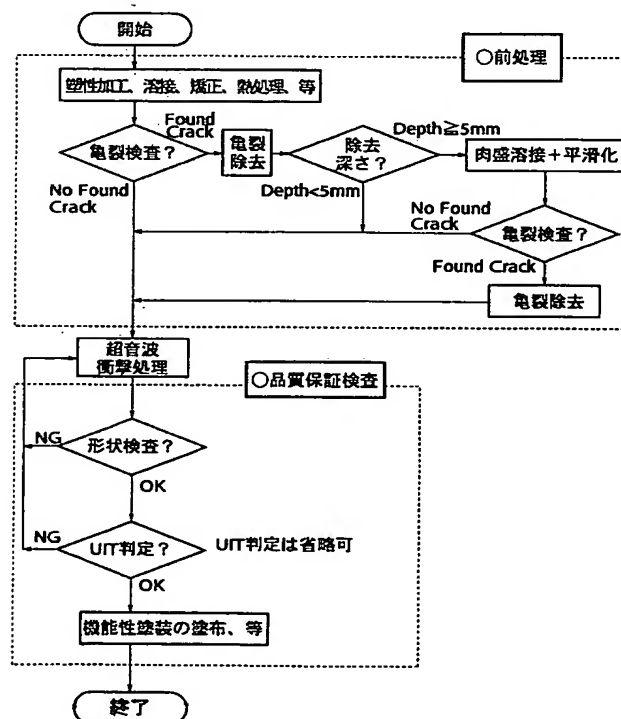
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 疲労寿命向上処理法およびそれによる長寿命金属材料

(57) 【要約】

【課題】 従来の応力集中を減らす金属材料の疲労向上処理法及び圧縮応力を導入する金属材料の疲労向上処理法における、施工上の効率、施工者の熟練の問題、及び処理後の効果を計測する手段がなく品質管理を行うことができないという問題を解決する新たな疲労向上処理法を提供することを目的とする。

【解決手段】 金属材料の疲労が問題となる箇所について、前処理を行った後、超音波衝撃処理を行い、さらにその後、品質保証検査を行うことによって、当該金属材料の疲労寿命を向上させることを特徴とした疲労寿命向上処理法。



【特許請求の範囲】

1
【請求項 1】金属材料の疲労が問題となる箇所について、前処理を行った後、超音波衝撃処理を行い、さらにその後、品質保証検査を行うことによって、当該金属材料の疲労寿命を向上させることを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 2】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の前処理において、金属材料の超音波衝撃処理を行う部分とその近傍部分について、塑性加工や、変形矯正、熱処理、溶接など金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行ったのち、超音波衝撃処理を実施し、超音波衝撃処理後にはそのような金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行わないことを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 3】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の前処理において、金属材料の超音波衝撃処理を行う部分とその近傍部分について、塑性加工や、変形矯正、熱処理、溶接など金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行ったのち、非破壊検査と超音波衝撃処理を実施し、超音波衝撃処理後にはそのような金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行わないことを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 4】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の前処理において、疲労寿命の問題となる箇所について、目視検査、浸透探傷検査、磁粉探傷検査、渦流探傷検査などを実施した上で、亀裂が検出されればその亀裂をグラインダーやガウジングなどで除去することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 5】請求項 4 に記載の疲労寿命向上処理法の亀裂除去において、除去深さが 5 mm 以上と深くなった場合は、溶接肉盛りを行った後、グラインダーで平滑に仕上げ、さらに目視検査、浸透探傷検査、磁粉探傷検査、渦流探傷検査などを実施した上で、亀裂が検出されないことを確認することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 6】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の超音波衝撃処理において、金属材料の溶接部における、止端部、HAZ 部、溶接部に対して処理を行い、形状を応力集中を生じにくいよう変形させると共に、圧縮残留応力を導入し、疲労発生の起点となる微小な欠陥を無害化し、亀裂の発生を抑制することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 7】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の超音波衝撃処理において、金属材料の鋸、せん断、ガス、レーザー、プラズマ等による切断による切断面およびその近傍に対して処理を行い、形状を応力集中が生じにくいよう変形させると共に、圧縮残留応力を導入し、疲労発生の起点となる微小な欠陥や極端に硬化した部分を無害化し、亀裂の発生を抑制することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 8】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の超

音波衝撃処理において、非破壊検査での検出限界以下の亀裂に超音波衝撃処理を用いて打撃による圧縮応力を導入し、進展を止めることを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 9】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の超音波衝撃処理において、疲労亀裂の発生が懸念される構造物及び構造物の箇所について、同一箇所について 2 パス以上超音波衝撃処理を行うことによって、非破壊検査での検出限界以下の亀裂に打撃による圧縮応力を導入し、より確実に進展を止めることを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 10】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、歯科用形象材などの型取り材を用いて、またはレーザー変位計などの高精度計測機でスキャンを行って、超音波衝撃処理後の形状の型を取り、その処理面の局面が処理に用いた超音波衝撃処理の工具先端の R（半径）とほぼ一致していること、また、処理前に比べ 0.05 mm 以上の深さで塑性変形を生じていること、を確認することによって、処理を行った部分で形状が改善され、圧縮残留応力が導入されたことによって疲労寿命が向上したことを確認することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 11】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、定常プロセスとして超音波衝撃処理が行われる場合、超音波衝撃処理先端工具の確認、機器出力設定の確認と、目視による処理部分における塑性変形の発生の確認により、処理を行った部分で形状が改善され、圧縮残留応力が導入されたことによって疲労寿命が向上したことを確認することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 12】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたって、処理表面をスンプ法によって金属の最表面の組織を観察し、処理されていない他の部分よりも組織が細粒化していることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 13】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたって、処理表面を超音波粒径計測装置によって金属の最表面の粒径を計測し、処理されていない他の部分よりも組織が細粒化していることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項 14】請求項 1 に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成さ

れた変形の計測にあたって、粗度計やレーザー変位計により処理表面の粗度を計測し、形成されたR（半径）を横断する方向について処理されていない他の部分よりも表面が平滑になっていることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項15】請求項1に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたり、処理表面のピッカース試験などにより硬さを計測し、処理されていない他の部分よりも表面硬度が20%以上100%未満の割合で硬化していることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とした疲労寿命向上処理法。

【請求項16】請求項1に記載の疲労寿命向上処理法の品質保証検査において、品質保証検査合格後の超音波衝撃処理部に対して、その後の使用時に亀裂が発生すると、塗膜内部に備えたマイクロカプセルがその亀裂部分で割れて、亀裂を発生したことを外部に容易に指示する、別色の塗料を浸出させる塗料を塗布することにより、その後の亀裂発生を示すことを特徴とする疲労寿命向上処理法。

【請求項17】請求項1～16のいずれかの疲労寿命向上処理法を用いて処理されたことを特徴とする金属材。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、例えば、橋梁の橋桁などの大型溶接構造物、自動車の足回り部分などの金属溶接製品、自動車のホイールなどの溶接を持たない金属材などに係り、特に疲労によって損傷を受ける部位における疲労亀裂に関する耐久性を高め、長寿命化を図るようにした疲労寿命向上処理法およびその処理法を用いて処理された金属材に関する。

【0002】

【従来の技術】金属製品の耐久性は、しばしば疲労によって規定される。このような疲労強度を向上させるためには、設計的に断面を大きくして応力を現象させるのが一般的ではあるが、その他、様々な疲労向上処理法が取られている。

【0003】疲労向上処理法は大きく分けて2種類あり、まず、疲労が問題となる部分の形状を変えて応力集中を少なくする、グラインディング、TIGドレッシングなどがある。また、疲労が問題となる部分に圧縮残留応力を与えて、実質的な繰返し応力範囲を小さくする、ハンマーピーニング、ニードルピーニング、ショットピーニング、低温変態溶材などがある。このうち、ハンマーピーニングに関しては、応力集中を少なくする効果と圧縮応力を導入する効果の両方を持つとされている。

【0004】上記の疲労向上処理法のうち、応力集中を少なくする処理法の効果は目に見えて明らかであるが、実際には、疲労が問題となる箇所においてはわずかな傷などが疲労強度をむしろ悪化させる原因となることがあるために、グラインダー処理などに関しては処理に熟練が必要のみならず、作業に時間が必要であり、大きなコスト増加要因となる。

【0005】また、TIGドレッシングに関しても、作業には熟練者が必要なのと、適用部位に熱を加えるために、橋梁の補修に使う場合などについては、応力変動に起因する溶接材料の高温割れを防ぐために作業中は交通を止める必要があるなど、やはり大きなコスト増加要因となる。

【0006】一方、圧縮残留応力を導入する方法であるが、圧縮残留応力は目に見えないために、処理後の影響が測定しにくく、検査によって効果を保証することが困難であるということが問題となり、品質管理上の観点から、判断・診断能力あるエンジニアが立ち会えないような状況では、通常は使われない。

【0007】また、ハンマーピーニングでは、処理部に大きな塑性変形を与えることができるため、処理の痕跡を大きくし、実施後に処理を特定することはできるが、処理時にできる表面の傷がかえって応力集中をもたらし、疲労強度を低下させることがあるのと、その塑性変形を与えよときの大きな反動のために著しく作業性が悪いために、細かいコントロールが困難であり、品質管理が非常に難しい。

【0008】また、上記のような圧縮残留応力を導入する疲労向上処理法を特に補修に用いる場合、疲労亀裂の発生初期である寸法1mm以下の小さな時点では、浸透探傷試験、磁粉探傷試験、渦流探傷試験などの現在の検査法では検出は不可能であるが、このような亀裂を残している状態で、上記の疲労寿命向上処理法を適用しても、亀裂の進展を止めることができないために、圧縮残留応力導入による疲労寿命向上効果はほとんど無いと考えられる。

【0009】また、低温変態溶材についても、止端部に圧縮残留応力を導入する場合についても、高強度鋼では効果が大きい、低強度鋼では効果がほとんど無くなってしまうという特性があるのと、やはり、溶接による熱が加えられることから、TIGドレッシング同様、施工上の問題があつて使いにくい部分があり、また、他の処理法と同様に導入した圧縮残留応力の効果が設測しにくい。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】上記のように、応力集中を減らす疲労向上処理法には、主に施工上の効率、施工者の熟練の問題があり、一方、圧縮応力を導入する疲労向上処理法には、その効果を計測して、品質管理を行うことができないことが問題であり、そのために、この

ような疲労寿命向上処理法を一般的に使うことは困難であった。

【0011】本発明は、上記の事情に鑑みてなされたもので、疲労向上処理法として、超音波で先端を振幅 $20\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$ 、周波数 $15\text{kHz} \sim 60\text{kHz}$ で振動させる工具を用いて、金属表面を打撃するピーニングを行う超音波衝撃処理という処理を行うと共に、その超音波衝撃処理が処理を行う金属に与える特性を利用した前処理及び検査を併せて行うことによってその効果を保証することにより、長寿命を実現する疲労向上処理法、および、それによる長寿命を持つ金属材を得ることを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記した課題を解決するために、第1の発明は、金属材の疲労が問題となる箇所について、前処理を行った後、超音波衝撃処理を行い、さらにその後、品質保証検査を行うことによって、当該金属材の疲労寿命を向上させることを特徴とする。

【0013】また、第2の発明は、上記第1の発明の前処理において、金属材の超音波衝撃処理を行う部分とその近傍部分について、塑性加工や、変形矯正、熱処理、溶接など金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行ったのち、超音波衝撃処理を実施し、超音波衝撃処理後にはそのような金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行わないことを特徴とする。

【0014】また、第3の発明は、上記第1の発明の前処理において、金属材の超音波衝撃処理を行う部分とその近傍部分について、塑性加工や、変形矯正、熱処理、溶接など金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行ったのち、非破壊検査と超音波衝撃処理を実施し、超音波衝撃処理後にはそのような金属内部応力、表面応力を変化させるプロセスを行わないことを特徴とする。

【0015】また、第4の発明は、上記第1の発明の前処理において、疲労寿命の問題となる箇所について、目視検査、浸透探傷検査、磁粉探傷検査、渦流探傷検査などを実施した上で、亀裂検出されればその亀裂をグラインダーやガウジングなどで除去することを特徴とする。

【0016】また、第5の発明は、上記第4の発明の亀裂除去において、除去深さが 5mm 以上と深くなった場合は、溶接肉盛りを行った後、グラインダーで平滑に仕上げ、さらに目視検査、浸透探傷検査、磁粉探傷検査、渦流探傷検査などを実施した上で、亀裂が検出されないことを確認することを特徴とする。

【0017】また、第6の発明は、上記第1の発明の超音波衝撃処理において、金属材の溶接部における、止端部、HAZ部、溶接部に対して処理を行い、形状を応力集中を生じにくいよう変形させると共に、圧縮残留応力を導入し、疲労発生の起点となる微小な欠陥を無害化し、亀裂の発生を抑制することを特徴とする。

【0018】また、第7の発明は、上記第1の発明の超

音波衝撃処理において、金属材の鋸、せん断、ガス、レーザー、プラズマ等による切断による切断面およびその近傍に対して処理を行い、形状を応力集中が生じにくいよう変形させると共に、圧縮残留応力を導入し、疲労発生の起点となる微小な欠陥や極端に硬化した部分を無害化し、亀裂の発生を抑制することを特徴とする。

【0019】また、第8の発明は、上記第1の発明の超音波衝撃処理において、非破壊検査での検出限界以下の亀裂に超音波衝撃処理を用いた打撃による圧縮応力を導入し、進展を止めることを特徴とする。

【0020】また、第9の発明は、上記第1の発明の超音波衝撃処理において、疲労亀裂の発生が懸念される構造物及び構造物の箇所について、同一箇所について2パス以上超音波衝撃処理を行うことによって、非破壊検査での検出限界以下の亀裂に打撃による圧縮応力を導入し、より確実に進展を止めることを特徴とする。

【0021】また、第10の発明は、上記第1の発明の品質保証検査において、歯科用形象材などの型取り材を用いて、またはレーザー変位計などの高精度計測機でスキャンを行って、超音波衝撃処理後の形状の型を取り、その処理面の局面が処理に用いた超音波衝撃処理の工具先端のR（半径）とほぼ一致していること、また、処理前から 0.05mm 以上の深さで塑性変形を生じていること、を確認することによって、処理を行った部分で形状が改善され、圧縮残留応力が導入されたことによって疲労寿命が向上したことを確認することを特徴とする。

【0022】また、第11の発明は、上記第1の発明の品質保証検査において、定常プロセスとして超音波衝撃処理が行われる場合、超音波衝撃処理先端工具の確認、機器出力設定の確認と、目視による処理部分における塑性変形の発生の確認により、処理を行った部分で形状が改善され、圧縮残留応力が導入されたことによって疲労寿命が向上したことを確認することを特徴とする。

【0023】また、第12の発明は、上記第1の発明の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたって、処理表面をスンプ法によって金属の最表面の組織を観察し、処理されていない他の部分よりも組織が細粒化していることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とする。

【0024】また、第13の発明は、上記第1の発明の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたって、処理表面を超音波粒径計測装置によって金属の最表面の粒径を計測し、処理されていない他の部分よりも組織が細粒化していることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とする。

【0025】また、第14の発明は、上記第1の発明の

品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたって、粗度計やレーザー変位計により処理表面の粗度を計測し、形成されたR（半径）を横断する方向について処理されていない他の部分よりも表面が平滑になっていることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とする。

【0026】また、第15の発明は、上記第1の発明の品質保証検査において、変形が超音波衝撃処理によって形成されたものか疑念が生じた場合、金属表面に形成された変形の計測にあたり、処理表面のピッカース試験などにより硬さを計測し、処理されていない他の部分よりも表面硬度が20%以上100%未満の割合で硬化していることを確認することにより、その変形が超音波衝撃処理により形成されたことを判別することを特徴とする。

【0027】また、第16の発明は、上記第1の発明の品質保証検査において、品質保証検査合格後の超音波衝撃処理部に対して、その後の使用時に亀裂が発生すると、塗膜内部に備えたマイクロカプセルがその亀裂部分で割れて、亀裂を発生したことを外部に容易に指示する、別色の塗料を浸出させる塗料を塗布することにより、その後の亀裂発生を示すことを特徴とする。

【0028】また、第17の発明は、上記第1～16の発明のいずれかの疲労寿命向上処理法を用いて処理された金属材料であることを特徴とする。

【0029】

【発明の実施の形態】金属の疲労破壊の発生は、応力集中と残留応力に大きく影響される。荷重を受ける金属材料においては応力集中部に転移がたまり、それがすべり線の蓄積となって亀裂に発展し、亀裂が発生後はそれが進展して行く。残留応力は、通常、溶接部などで引張残留応力として存在し、実効的な繰返し応力範囲を拡大させて亀裂を発生しやすくするとともに、生成した亀裂の開口を促進すると考えられている。そのため、金属材料の疲労寿命を向上させるには、応力集中を緩和するとともに、残留応力をできるだけ圧縮状態に近づけることが必要となってくる。

【0030】金属の溶接部には、表面形状の急変部と引っ張り残留応力の両方が存在し、疲労強度的に最も弱点となる。この表面形状の急変部が切り欠きとして作用し、応力集中部となるために、この応力集中部に塑性変形を与え、なだらかな止端半径が大きな曲面によって形成された表面を形成することが、応力集中部を緩和することになる。また、このとき金属の板厚方向に塑性変形を与えれば、その塑性化した金属が周囲の金属によって拘束されることによって圧縮力が導入される。

【0031】また、金属の切断端面にも、表面の急変部と、切断に伴う引っ張り応力、せん断応力が存在するた

めに、疲労的な弱点になる。これも、端面に対して直角方向に塑性変形を与える。または、端面の角を曲面上にるように塑性変形を与えることによって、形状改善と圧縮応力の導入ができる。

【0032】このような、金属に対する塑性加工を可能とする手段として、超音波で先端を振幅 $20\mu\text{m}$ ～ $60\mu\text{m}$ 、周波数 15kHz ～ 60kHz で振動させる工具を用いて、金属表面を打撃するピーニングを行う超音波衝撃処理という処理がある。この手法を用いることによって、金属表面に塑性加工を行い、深さ 1.5mm ほどにまで圧縮残留応力を導入することができる。

【0033】この超音波衝撃処理という手法は、基本的にはハンマーピーニングと疲労強度向上に関する基本メカニズムは変わらないが、一回一回の打撃のエネルギーを小さい変わりに、1秒間に1万回以上の打撃を与えることによって、同じような塑性変形を実現している。しかも、一回一回の打撃力は小さいために、機器に生じる反動はほとんどまったく無く、ハンマーピーニングと比較して使用性、施工性の面で非常に有利である。

【0034】また、この超音波衝撃処理という処理は、この金属表面に対し非常に多くの回数の打撃を与えているということで、鋼材表面に対して従来のハンマーピーニングには無い効果をもたらしている。また、一回一回の打撃エネルギーがショットピーニングより大きいことで、従来のショットピーニングにも無い効果をもたらしている。

【0035】まず、回数を多く表面を叩くことで、処理の均一性が得られる。ハンマーピーニングでも数パスを同一線上で実施すればある程度の均一性が得られることは知られているが、超音波衝撃処理の打撃サイクル数は $15\sim 60\text{kHz}$ であり、その得られる均一性はハンマーピーニングと全く異なるレベルにあり、処理スピードが 0.5m/分 程度であれば、ほとんど金属表面を均一に仕上げ、欠陥を全く残すことがない。

【0036】また、その処理後の表面は著しい平滑さを持つ。図2(a)、(b)に示さる処理前後の金属表面の平滑度を比較すると、超音波衝撃処理による処理後の平滑さは、グラインダー仕上げ後の金属表面よりも著しく平滑であることがわかる。

【0037】また、処理後の金属表面の組織は超音波を利用して塑性加工を数多く繰返すことによって、著しく組織が細かくなることがわかっている。(Surface Nanocrystallization (SNC) of metallic Materials—Presentation of the Concept behind a New Approach, J. Master.Sci.Technol.Vol.15 No. 3, 1999)

【0038】実際、超音波衝撃処理を疲労向上の目的で鋼材に使った結果、処理前後で鋼材組織は大きく変化し

ている。このような、鋼材の組織を細かくする効果は、特に鋼材の組織が粗大化する溶接近傍のHAZ部で顕著であり、通常は100 μ mまで粗大化するHAZの粒径が、超音波衝撃処理の処理後はほとんど粒径が観察できないほどの寸法に小さくなっており、独特な鋼材組織が超音波衝撃処理によって達成されている。

【0039】また、超音波衝撃処理によって鋼材の表面での鋼材の組織が細くなるのに伴って、硬さが増す。図3に超音波衝撃処理後の母材部、溶金部、HAZ部の硬さの分布を示すが、特に溶接鋼構造物によく用いられる強度の鋼については、硬さが20%以上増していることがわかる。ほか、材質と処理時間によっては、硬さは最大、処理前の約2倍まで増加することがあるが、ただし、これは固くてもろいマルテンサイトとなったわけではなく、主に、細粒化による効果と、転移の蓄積による加工硬化であるため、溶接割れをもたらしうな種類の硬さの増加ではない。

【0040】鋼板の疲労破壊は、亀裂の発生と進展から構成される。亀裂発生寿命と亀裂進展寿命の合計が疲労亀裂にいたる全寿命となる。そして、応力集中や、残留応力が厳しい箇所から亀裂が発生するケースが多く、発生した亀裂は、さらに進展を継続して最終的に部材の破断に至る。鋼板の疲労破壊の寿命を向上させるためには、疲労亀裂の発生及び疲労亀裂の進展を抑制することが必要である。

【0041】しかし、通常はいったん鋼材に亀裂が発生すると、その亀裂先端での応力集中は極めて大きく、この進行を止めることは極めて困難であるとされている。例えば、先端にストップホールをあけ、その穴を高力ボルトで締め上げても、亀裂先端を残した場合はボルト内部に亀裂が進展して、切断してしまうことすらある。

【0042】初期の疲労亀裂を観察すると、まわし溶接試験体の疲労試験中のひずみ計測により、発生を検知した時点の亀裂の状態である初期の疲労亀裂を観察すると、この時点でまわし溶接継ぎ手での普通の疲労寿命の約1割が経過しており、残りの9割の寿命は、この亀裂の進展寿命であり、この亀裂を取り除かない限りほとんど決まってしまう状態にある。

【0043】しかしながら、この状態の亀裂は通常の浸透探傷試験や、磁粉探傷試験では検知することができない。もし、この状態で従来の疲労寿命向上手法であるハンマーピーニングやショットピーニングを行ったとすると、この亀裂を残したまま処理を行ってしまうため、見かけ上は処理面には塑性変形が生じているが、亀裂の進展は止められないために、改善効果は形状改良による応力集中の低減程度しかなく、寿命がほとんど伸びないという状況が考えられる。

【0044】ところが、この状態でも超音波衝撃処理を行うと、深さ1.5mm程度まで塑性変形による圧縮応力を導入するために、亀裂を叩き潰し、亀裂先端を開口

しないようにしてしまえる。もちろん、圧縮応力を導入できる深さは、ハンマーピーニングでも同程度以上の深さが可能であるが、ハンマーピーニングは処理効果にむらがあり、亀裂を叩けずに残す部分が多いと考えられ、その点、超音波衝撃処理は前述のように打撃回数が著しく多いために、均一に亀裂の開口を抑制することができる。

【0045】よって、効果的に疲労寿命向上効果を得るには、溶接金属製品については超音波衝撃処理を溶接部の止端部を中心に、溶接金属部、HAZ部に処理することが基本である。もっとも疲労的な弱点になる溶接金属とHAZの境界面を疲労に対して強化する、また、溶接金属部表面に生じる高温割れの悪影響も著しく緩和できる。ただし、低温の水素割れについてはほとんど効果を持たないと考えられるので注意が必要である。

【0046】また、溶接が無くても疲労的な弱点となる金属の、鋸、せん断、ガス、レーザー、プラズマなどによる切断面からの疲労に対して、効果的に疲労寿命を得るには、切断端面に対して超音波衝撃処理を行う。これにより、切断に伴って端面に入る過大な引っ張り応力、せん断応力を緩和し、また、圧縮応力を導入すると共に、切断に伴ってできるバリなどの応力集中部を塑性変形により、なだらかな曲面に整形し、また特にガス、レーザー、プラズマなどの熱の入力を伴う切断方法に伴って端面に生じる、極端に硬化した層を無害化することができる。このとき、出力を上げすぎて、端面に有害な変形を与えないように注意することが必要であるが、これは反動が少なく、コントロールが容易な超音波衝撃処理でようやく可能となることであり、従来のハンマーピーニングでは実行不可能であり、ショットピーニングでは効率が上がらなかった。

【0047】このような、溶接部、切断端部などでの処理にあたっては、1処理線での処理回数は1パスでも充分であるが、より均一性を高めたい場合や、よりコントロール性を向上させたり、過大な塑性変形を防止するために、処理1回あたりの入力パワーを抑えたい場合は、2回以上の処理を同一線上に対して行うことにより、より確実な疲労寿命向上効果を得ることができる。

【0048】前記説明の通り、超音波衝撃処理によって金属の組織は、他の圧縮応力導入系の疲労寿命向上処理手法による効果と比較してユニークな変化を生じるため、処理金属表面の、粗度、硬さ、組織状態（粒径）を、観察することによって、比較的容易に金属表面に生じた塑性変形の痕跡について、超音波衝撃処理によるものかどうかを判別することができる。

【0049】このような処理後の表面状態は、スンプ法のように複製を作成して組織観察することも可能であるし、変位計などで走査して直接計測することも可能である。また、硬さはヴィッカース試験などを用いて容易に計測することができる。さらに、粒径だけを計測するの

であれば、超音波を用いた粒径計測機などの利用が簡易である。

【0050】また、応力集中の度合いは、処理後の形状を計測することによって容易に達成される。処理前後の溶接部止端の状況を観察すると、止端形状が処理先端工具の形状に合わせて変形していることがわかる。応力集中部に超音波衝撃処理によって形成された曲面の持つ曲率は、もちろん大きければ大きいほど応力集中係数が下がるが、超音波衝撃処理の場合、導入される圧縮応力との関係もあるために、経験的にR（半径）が0.5mm～3.0mm程度の曲面を持つ工具で処理を行うと疲労向上効果が高いため、おおむねこの曲率で応力集中部が加工される。

【0051】そして、導入される圧縮応力の大きさは、処理前の表面から、処理後に金属の深さ方向にどれだけ塑性変形したかによって、類推される。基本的には、深さ方向への塑性変形量が大きければ大きいほど導入される圧縮力は増加すると考えられるが、上述のように超音波衝撃処理によって形成される塑性変形量、および、それによって得られる疲労向上効果は、工具のもつ曲率とも関係するため、Rが小さければ塑性変形深さは大きく、Rが大きければ塑性変形深さは小さくなるが、経験的にはRが0.5mm～3.0mm程度で、塑性変形深さは0.05mm以上、1.0mm以下程度にあれば、十分に疲労向上効果が得られる。

【0052】このような処理後の形状は、歯科用形象材のような不定形材料を用いて複製を作成して検査することが一般的で容易であるが、レーザー変位計などで走査して直接計測することも可能である。

【0053】ただし、超音波衝撃処理の機器が工場のラインに設置されて、新規に金属材を制作している場合などに関しては、前処理における亀裂の検査は、通常の方法に対するレベルの目視での有害な傷の有無の確認で代えることができ、また、処理後の品質管理においても、超音波衝撃処理による処理は明白であるために、超音波衝撃処理の先端工具の確認、および、その出力設定の確認、そして、目視での製品に超音波衝撃処理による塑性変形発生の有無の確認のみで代えることができる。

【0054】圧縮残留応力を与える疲労寿命向上手法で留意しなければならないのは、その金属材の超音波衝撃処理を行う部分とその部分に影響を及ぼす可能性のある近傍部分については、超音波衝撃処理によって導入された圧縮残留応力を、その金属材の製作のために必要な他の、曲げ加工、矯正、熱処理、さらに溶接などの塑性変形を伴うプロセスによって変えてしまわないようにすることが必要である。すなわち、当該箇所について、それらの全てのプロセスをすませた後で、最後に超音波衝撃処理を行うという順番を遵守することが必要である。

【0055】品質保証検査で所定の性能を持つことを確認した後、その効果をさらに高める手段がある。それ

は、処理後に、処理箇所に施す塗装に機能性を持たせることである。塗装には、別の色の塗料を入れたマイクロカプセルを混入させることができる。これにより、外部からのその塗装への刺激により、マイクロカプセルを割ることによって、内部の塗料を浸出させることが可能となる。

【0056】このような機能性塗装として、亀裂が生じた時点で、その塗装に生じたひずみによってマイクロカプセルが割れるようにして、亀裂の位置を示すことのできるスマートペイント（US 5,534,239）と呼ばれるものを、超音波衝撃処理の場所に塗布すれば、目視がしやすくなり、使用開始後の検査が容易になる。

【0057】図1は、本願発明の疲労寿命向上処理法をフローチャートで示したものである。以上説明したような、超音波衝撃処理の持つ特性を利用して、確実に疲労向上効果が得られるように、大きくは、前処理、超音波衝撃処理、品質検査の順番で規定をしている。

【0058】この発明によって得られた効果を確認するために疲労実験を実施した。この疲労実験は、まず、初期疲労が発生するまで疲労載荷を行い、その後、前処理として磁粉探傷試験を行い、その時点で疲労亀裂が見つからなかったのを、特に疲労亀裂の除去等は無く超音波衝撃処理を行い、それから再度、疲労実験を行ったものである。最初の載荷によって導入された疲労亀裂は無害化され、疲労寿命は200MPaで30万回から150万回以上と5倍以上に向上した。

【0059】この発明の特徴は、検出不可能なレベルの疲労亀裂であれば亀裂先端への塑性変形と圧縮応力の導入によって無害化することができるために、通常的手法と異なり、亀裂が発見されていない箇所についても、検査時に疲労発生予防措置として処理を行うことができる。これによって、疲労の向上が見込めるために、処理をした金属製品の疲労に関わる定期検査の間隔を長くとり、メンテナンスコストの削減が可能になる。

【0060】また、処理後に亀裂検査を容易とするような機能性塗料を塗布することによって、メンテナンスコストの削減が可能になる。

【0061】このように、この発明を用いて処理した金属製品は、通常に使う繰返し作用応力の領域では、確実に3倍以上の疲労寿命を確保することができる。

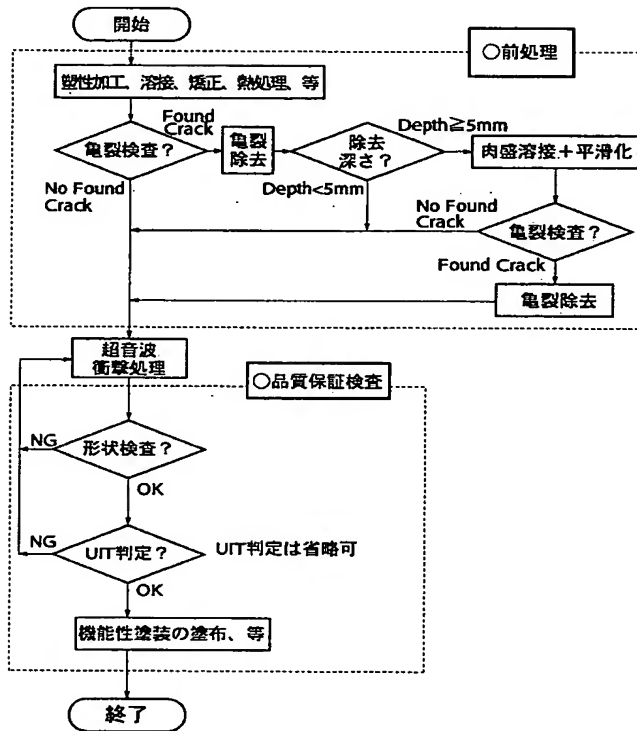
【0062】

【発明の効果】このように、本発明に係る疲労寿命向上手法および、それによって処理された金属製品によれば、超音波衝撃処理という新しい疲労寿命向上処理法を、適切な前処理と処理後の品質検査法と組み合わせることによって、新設、補修、溶接の有無、などにかかわらず確実に金属表面から発生する疲労を抑制し、疲労寿命の向上を図ることができるという顕著な効果を奏するものである。また、従来の非破壊検査で検出し得ない小さな寸法の疲労亀裂を残した状態でも、疲労強度の向上

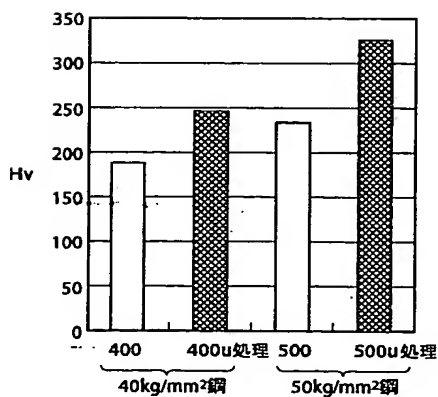
を図ることができるため、検出可能な疲労亀裂の発生を待つことなく、予防的に金属製品にこの疲労向上手法を適用することが可能となり、さらに、その後の亀裂の発見を容易にする機能性塗料を、処理後に塗布することにより、特に橋梁などの鋼構造物に関してはメンテナンスコストの削減が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】



【図3】

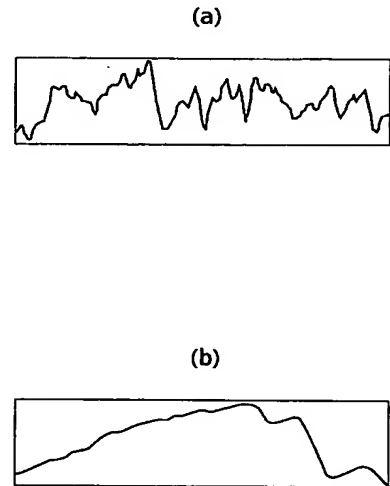


【図1】本願発明の疲労寿命向上処理法をフローチャートで示した図。

【図2】グラインダー仕上げ後の金属表面の平滑度と、本願発明の超音波衝撃処理後の金属表面の平滑度を表す図。

【図3】本願発明の超音波衝撃処理前後の金属表面の硬さを比較した図。

【図2】



フロントページの続き

(72)発明者 石川 忠
富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社技
術開発本部内

(72)発明者 糟谷 正
富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社技
術開発本部内

(72)発明者 本間 宏二
富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社技
術開発本部内